Sondenmessungen im aërodynamischen Feld.

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR

ERLANGUNG DER PHILOSOPHISCHEN DOKTORWÜRDE

VORGELEGT DER

HOHEN PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT

DER

UNIVERSITÄT BASEL

VON

KARL GEGAUFF

AUS MÜLHAUSEN im ELSASS.

BASEL
Buchdruckerei zum Hirzen A.-G.
1916.

Sondenmessungen im aërodynamischen Feld.

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR

ERLANGUNG DER PHILOSOPHISCHEN DOKTORWÜRDE

VORGELEGT DER

HOHEN PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT

DER

UNIVERSITÄT BASEL

VON

KARL GEGAUFF

AUS MÜLHAUSEN im ELSASS.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

BASEL
Buchdruckerei zum Hirzen A.-G.
1916.

Genehmigt von der mathematisch-naturwissenschaftlichen Abteilung der philosophischen Fakultät auf Antrag der Herren Professoren Dr. A. Hagenbach und Dr. H. Zickendraht.

Basel, den 6. Juni 1916.

Prof. Dr. **Fr. Fichter,**
Dekan.

Vorliegende Dissertation ist unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. A. Hagenbach entstanden.

Inhaltsverzeichnis.

Geschichtliches.

I. Teil: Untersuchungen zwecks Schaffung einer Sonde.

a) Beschreibung der bisher bekannten Sonden.

b) Untersuchungen mit meiner neuen Nadelsonde.

c) Die Verwendung und Aichung der Nadelsonde.

d) Betrachtungen über die Scheibenmethode.

e) Beschreibung der Messvorrichtung mit der Nadelsonde.

f) Verwendungsweise der Nadelsonde (Handhabung).

II. Teil: Messungen im aërodynamischen Felde einer runden Platte.

4 Tabellen.

Geschichtliches.

Die vorliegende Arbeit bezweckt die experimentelle Auswertung eines aërodynamischen Feldes, für den Fall eines dem freien Winde oder einer stationär bleibenden freien Luftströmung ausgesetzten, unbeweglichen Körpers.

Es handelt sich also einerseits darum, die Geschwindigkeitsverteilung nach Grösse und Richtung, andererseits die Druckverteilung (den statischen Druck) im gegebenen Felde zu messen.

Der Verlauf der Strömung um einen Körper ist von verschiedenen Forschern schon dargestellt worden.

Den Weg dazu hat zuerst *Ahlborn*[1]) an hydrodynamischen Versuchen gewiesen. Er stellte auf photographischem Wege die Laufbahnen der Wasserteilchen um einen, in ruhendes Wasser eingetauchten, geradlinig und gleichförmig sich fortbewegenden Körper dar. Zu diesem Zwecke wurde die Oberfläche des Wassers mit feinen Bärlappsamenkörnchen bestreut, wodurch die Wasserbewegungen sichtbar und photographierbar wurden.

Der Versuchsapparat bestand aus einem wagerecht liegenden, etwa 2 m langen und 0,50 m breiten und ebenso tiefen hölzernen Kasten, dessen oberer Teil offen und welcher mit Wasser beinahe angefüllt war.

Der nicht ganz eingetauchte Versuchskörper war an einem eisernen Wagen befestigt, welcher ausserhalb des Wassers auf wagerechten, eisernen Schienen rollend, durch Motorantrieb eine fortschreitende, gleichförmige Bewegung erhalten konnte.

An demselben Wagen war noch in geeigneter Entfernung, oberhalb des Versuchskörpers, eine photographische Kammer befestigt.

In dem Augenblicke wo der Wagen die Mitte seiner Bahn passierte, wurde durch elektrische Zündung eines Magnesium-

[1]) Fr. Ahlborn: Ueber den Mechanismus des hydrodynam. Widerstandes. Abhandl. aus dem Gebiete der Naturwissenschaft. — Hamburg, Bd. 17 (1902). Vgl. auch physikalische Zeitschr. XI, S. 201 (1910).

Blitzlichtes, die Wasseroberfläche für die Dauer von $^1/_{30}$ Sekunde beleuchtet und von der mitfahrenden, photographischen Kammer aufgenommen.

Die relative Geschwindigkeit war nach ihrer Richtung, und sogar bis zu einem gewissen Grad nach ihrer Grösse auf dem Bilde messbar, indem durch die Bewegung der Samenkörnchen, diese nicht als Punkte, sondern als Striche erscheinen, deren Länge der relativen Geschwindigkeit proportional ist, und deren Richtung diejenige der relativen Bahnen zum Körper angibt.

Als Masstab für die Grösse der Geschwindigkeit dient die Länge der Striche an Stellen der Luvseite, an denen das Wasser noch keine Störung erlitten hat, da diese die bekannte Geschwindigkeit des Wagens darstellt.

Endlich hat *Ahlborn* noch die Druckverteilung an der Körperoberfläche messbar gemacht, indem die Höhe der Stauung des Wasserspiegels an der Luvseite und dessen Depression an der Leeseite beobachtet und gemessen wurden. Dies geschah durch Färbung des Wassers und teilweise Bedeckung der Körperoberfläche mit weissem Papier oder dergleichen, wodurch die Benetzungslinie sichtbar wurde und gemessen werden konnte.

Dabei war angenommen, dass der Druck dem Niveau-Unterschied zwischen Benetzungslinie und Wasserspiegel in ruhendem Zustand proportional sei.

Eine Messung der Druckverhältnisse im hydrodynamischen Felde selbst war indessen durch diese Versuche nur indirekt möglich.

Riabuchinsky[1]) hat das Ahlborn'sche Verfahren auch auf Luft übertragen; auf dem Hintergrunde schwarzen Papiers heben sich die Wirbelbilder aus hellem Lycopodiumsamen deutlich ab und geben so ein Bild des Feldes in der Umgebung eines umströmten Körpers.

Eiffel[2]) suchte die Stromlinien mittels zarter Seidenfäden, die er in den Luftstrom hineinbrachte, zu verfolgen.

---

[1]) Riabuchinsky: Bulletin de l'Institut aérodynamique de Koutchino 1905 et 1907.

[2]) G. Eiffel: La résistance de l'air, Paris 1910.

Marey[1]) hat durch parallele Rauchfäden den Verlauf eines gleichmässigen Luftstroms sichtbar gemacht. Diesem Luftstrom werden dann verschiedene Körper entgegengestellt, so wird das entstehende Feld photographisch festgehalten.

H. Coanda,[2]) der Konstrukteur eines Aëroplans, hat ebenfalls Stromlinienbilder nach der Rauchfadenmethode erhalten.

Statt Rauchfäden sind auch Fäden eines Gases, das sich durch seine optische Eigenschaften von der Luft unterscheidet, verwendet worden.

So hat *Lafay*[3]) das Feld, welches von verschiedenen Flächen herrührt, sichtbar gemacht und auch photographiert, indem er dem Luftstrom einen dünnen Strahl von Azetylen beimengte, und diesen mittels einer optischen, von A. Töpler angegebenen Methode, sichtbar machte.

Mach[4]) hat einfach heisse und kalte Luft verwendet. Es werden aus einer intensiven, möglichst punktförmigen Lichtquelle, Strahlen auf den zu untersuchenden Körper (z. B. eine Platte) gerichtet, und der Schatten desselben auf einer Wand aufgenommen. Stellt man dann unter den Körper zwei feine Flämmchen, welche sich in einem langsam von unten aufsteigenden, kalten Luftstrom befinden, so sieht man im Schattenbild ganz deutlich die Stromlinien und Wirbel.

Nach dieser letzten Methode hat *H. Zickendraht*[5]) recht gelungene photographische Aufnahmen gemacht.

Ebenso hat auch *Tanakadaté*[6]) nach der „Schlierenmethode" die Luftwirbel hinter den Flügeln einer arbeitenden Luftschraube nachweisen können.

Die Druckverteilung im Felde wurde schon von *Prandtl* mittels eines besondern Messgerätes erforscht. Ein solches besitzt das Göttinger Versuchslaboratorium,[7]) die Konstruktion gibt *Prandtl* aber nicht an.

---

[1]) M. Marey: Comptes rendus hebd. de l'Academie des Sciences de Paris. T. 132, p. 1291 (1901).

[2]) Vgl. die Bemerkung in der Zeitschrift für Flugtechnik und Motor-Luftschiffahrt II, S. 168 (1911).

[3]) A. Lafay: Comptes rendus, T. 152, p. 694 (1911).

[4]) L. Mach: Zeitschr. f. Luftschiffahrt u. Physik der Atmosphäre, S. 129 (18 6).

[5]) H. Zickendraht: Ann. der Physik IV, Bd. 35, S. 73 (1911).

[6]) A. Tanakadaté: Comptes rendus, T. 151, p. 211 (1910).

[7]) L. Prandtl: Zeitschr. d. Ver. Deutsch. Ing., Bd. 33, S. 1716 (Fig. 12) (1909).

Andererseits hat *H. Zickendraht*[1]) eine Untersuchung der Druckverteilung im aërodynamischen Feld ausgeführt, wobei er sich einer neuen vorzüglichen, von ihm geschaffenen Sonde bedient. Ich werde später darauf zurückkommen.

Er hat auch noch dazu ein eigenes aërodynamisches Instrumentarium geschaffen, welches leicht die Untersuchung des Feldes gestattet; dasselbe enthält auch einen Koordinaten-Apparat, mittels welchem man den Vertikal- und Horizontalabstand der Sonde, an Skalen ablesbar, von einem festen Koordinatenanfangspunkte im aërodynamischen Felde aus gerechnet, messen kann.

Auf diese Weise hat *H. Zickendraht* die Druckverteilung um eine, dem Luftstrom ausgesetzte, rechteckige dünne Platte, und zwar sowohl senkrecht als auch in geneigter Stellung zum Winde, ermittelt.

Ich habe mich zur Bestimmung der Druck- und Geschwindigkeitsverteilung, ausschliesslich der manometrischen Methode bedient, und zu diesem Zwecke eine eigene Sondenform, sowie auch eine eigene Anordnung für deren Verwendung geschaffen, welche im Folgenden beschrieben werden soll.

[1]) H. Zickendraht: Ann. d. Physik IV, Bd. 35, S. 59 (1911).

Erster Teil.

Untersuchungen zwecks Schaffung einer Sonde.

a) Beschreibung der bisher bekannten Sonden:

Um eine genaue Erforschung des aërodynamischen Feldes mittels Sondenmessungen ausführen zu können, sollte die dazu dienende Sonde folgende zwei Haupteigenschaften besitzen:

I. Dieselbe soll imstande sein, sowohl den statischen Druck[1]) als auch die Geschwindigkeit, nach Grösse und Richtung anzugeben; auch soll die Messung nicht viel Zeit in Anspruch nehmen.

Es wäre in der Tat für die Genauigkeit bedenklich, wenn zur Messung des statischen Drucks und der Geschwindigkeit zwei verschiedene Sonden benützt werden müssten, weil die Druck- und Geschwindigkeitsverhältnisse sich inzwischen etwas ändern können. Eine absolute Konstanz dieser Verhältnisse zu erreichen, ist bei den gewöhnlich zur Verfügung stehenden Luftströmen nicht möglich.

II. Die Dimensionen des Sondenkopfes, mit welchem die Messungen ausgeführt werden sollen, müssen klein genug sein, so dass die durch seine Gegenwart entstehende Störung des Feldes vernachlässigt werden kann.

Da nun in der vorliegenden Arbeit nur aërodynamische Feldmessungen an k l e i n e n Körpern ausgeführt wurden, musste natürlich auch der dazu verwendete Sondenkopf von äusserst kleinen Dimensionen sein, namentlich wenn die Messungen bis dicht an der Körperoberfläche angestellt werden sollen.

---

[1]) Unter „statischem Druck“ in einem Punkte des Feldes verstehe ich den „Überdruck“ gegenüber einem Orte im störungsfreien Felde, welcher mit Aenderung des spezif. Gewichtes der Luft in Verbindung steht. Dieser Ueberdruck ist eine Folge der Bewegung. (Der statische Druck kann somit einen positiven oder negativen Wert haben).

Aus diesem letzten Grunde waren daher schon von vornherein eine ganze Anzahl, sonst gut arbeitender Sonden, ausgeschlossen. Es sind dies etwa folgende:

1. Die gewöhnliche Pitot-Röhre (siehe Fig. 1).

2. Die Recknagel'sche Stauscheibe[1]) siehe Fig. 2). Dieselbe besteht aus einer runden hohlen Scheibe A, deren eine Wand ein kleines Loch *a* in der Mitte trägt, welches zur Aufnahme des Druckes dient, und durch Vermittlung der Röhre C, diesen auf das Manometer überträgt. Man misst den Druck, während die Scheibe senkrecht zur Windrichtung steht, indem das Loch *a* einmal dem Wind entgegen, das andremal in der Richtung des Windes schaut. Aus beiden Messungen kann dann der statische Druck und die Grösse der Geschwindigkeit berechnet werden. Es fehlt indessen die Möglichkeit einer genauen Bestimmung der Geschwindigkeitsrichtung.

3. Eine andere gute Sonde ist auch das Krell'sche Pneunometer[2]) (siehe Fig. 3).

Dieses besteht aus zwei aneinander befestigten Recknagel-'schen Stauscheiben A und B, deren Druckdifferenz (aufgenommen durch die feinen Öffnungen a und b) mittels Differentialmanometer abgelesen wird, diese Ablesung liefert die Geschwindigkeit.

Man liest noch den Druck auf die vordere Scheibe A allein ab, was im Verein mit der ersten Ablesung die Berechnung des statischen Drucks erlaubt.

Es sind ausserdem noch Sonden bekannt, welche ausschliesslich zur Messung des statischen Drucks dienen.

Diese Sonden beruhen auf besondern Prinzipien.

4. Eine der ersten war diejenige von *Nipher* (Nipher-Kollektor)[3]) (siehe Fig. 4).

Sie besteht aus zwei planconvexen, runden Scheiben A und A, zwischen denen sich mehrere Lagen Drahtgewebe B befinden; das Gewebe steht über die Scheibenränder etwas vor. Mittels

[1]) G. Recknagel: Annalen der Physik. Bd. 10, S. 677 (1880).

[2]) O. Krell (jun.): Ueber Messung von dynam. u. statischem Druck bewegter Luft. Verlag: R. Oldenbourg, München-Berlin (1904).

[3]) F. E. Nipher: A method of measuring the pressure. Transact. of the Academy of Sciences of St. Louis (1898).

einer feinen Röhre C steht das Innere des Kollektors in Verbindung mit dem Manometer.

Diese Sonde zeigt direkt den statischen Druck an.

5. Auf einem ähnlichen Prinzip beruht die Sonde von *H. Zickendraht*[1]) (siehe Fig. 5), nur kann hier der Sondenkopf viel kleinere Dimensionen annehmen, weshalb diese Sonde in mehr Fällen Verwendung finden wird. Ausserdem erfolgen ihre Angaben viel rascher und sind mindestens ebenso genau. Ich habe die Genauigkeit ihrer Angaben mit der später beschriebenen Aichungsmethode geprüft, welche mir auch zur Aichung meiner endgültig verwendeten Druck- und Geschwindigkeits-Sonde diente.

Die Drucksonde von *H. Zickendraht* besteht aus zwei Stahlkörpern, dem Kopfe A und dem Halse B, dessen Mündung trichterförmig ausgedreht ist. In dieser Mündung steckt der Stift, welcher den Kopf trägt. Zwischen Stift und Halsmündung ist ein kleiner Spielraum vorgesehen, zwischen Kopf A und Öffnung des Halses B entsteht ein ringförmiger Spalt D von einstellbarer Weite. Das Rohr C wird in Verbindung mit dem Manometer gebracht.

Die Sonde zeigt direkt und fast augenblicklich den statischen Druck in irgend einem Orte des Feldes an.

6) Erwähnt sei noch die „Kugelsonde“ von *O. Krell*, jun.[2]), deren Kopf aber viel grösser sein muss und die deshalb nicht überall verwendet werden kann; ausserdem gibt sie den statischen Druck nicht direkt an, sondern bedarf einer jedesmaligen rechnerischen Korrektur, welche etwas umständlich ist.

7. Ein anderes Prinzip liegt der Drucksonde von *Prandtl*[3]) zu Grunde (siehe Fig. 6), welche von ihrem Erfinder bei Messungen in Entstaubungsanlagen benutzt wurde.

Dieselbe zeigt den statischen Druck direkt an. Sie besteht aus einer gebogenen Röhre C A B, deren Ende B schneidenartig plattgequetscht und dadurch verschlossen ist, und deren glatter zylindrischer Teil A beiderseits eine Anzahl kleiner Löcher a, a, je zwei auf jeder Seite trägt, diese Öffnungen verbinden das Innere der Sonde mit der Aussenluft. Das Messrohr A B muss

[1]) Hans Zickendraht, l. c.
[2]) O. Krell (jun.), l. c.
[3]) L. Prandtl, l. c.

mit der Schneide gegen den Wind (wie die Figur es zeigt) gestellt werden.

8. Auf einem ähnlichen Grundgedanken wie die *Prandtl*'sche Drucksonde, beruht die Sonde von *Ser*[1]) (Ser'sche Scheibe), welche ebenfalls den statischen Druck genau anzeigen kann (siehe Fig. 7).

Sie besteht aus einer sehr dünnen Rundscheibe A mit scharf geschliffenem Rande, welche senkrecht auf dem Rohrende C steht; dieses wird mit dem Manometer verbunden.

Bei der Messung des statischen Drucks muss aber streng darauf geachtet werden, dass die Scheiben-Ebene genau in der Windrichtung liegt, weil schon geringe Abweichungen grosse Fehler in der Angabe des statischen Drucks zur Folge haben. Es erscheint daher ganz unerlässlich, die *Ser*'sche Sonde mit einer speziellen Vorrichtung zu versehen, welche die genaue Einstellung der Scheibe gewährleistet. Diese Vorrichtung fehlt indessen, es ist daher die *Ser*'sche Scheibe in ihrer Originalform nicht zu empfehlen.

9. Eine von *Abbé*[2]) herrührende Sonde bildet eine Uebergangsstufe zwischen der *Ser*'schen Scheibe und der *Prandtl*'schen Sonde. Sie besteht aus einer *Ser*'schen Scheibe, in Verbindung mit einer zu ihr parallelen, in kleiner Entfernung von der ersten befestigten zweiten Scheibe ohne Loch.

Dadurch ist die genaue Einstellung in der Windrichtung nicht in dem Grade erforderlich wie bei der *Ser*'schen Scheibe, die Parallelscheibe soll nämlich die Luft zwingen, senkrecht zur Achse der Messöffnung vorbeizufliessen.

b) Untersuchungen mit meiner neuen Nadelsonde.

Um den beiden oben genannten Bedingungen, welche eine Sonde zu Messungen im Felde kleiner Körper, erfüllen sollte, zu genügen, habe ich folgende Sondenform verwendet:

Die Sonde besteht aus einer geraden, sehr feinen Stahlröhre A (äusserer Durchmesser = 1,6 mm, innerer = 1 mm) deren eines Ende, welches als Sondenkopf dient, verschlossen ist, und seitlich, in einer Entfernung von 1,2 mm vom Ende ein sehr kleines

[1]) Ser: Traité de Physique Industrielle (1888).
[2]) Abbé: Report of the Chief Signal Officer (1887) 2, 144.

Loch a, (von 0,4 mm Durchm.) trägt, (siehe Fig. 11, welche diesen Sondenkopf separat, in doppelter Naturgrösse darstellt).

Die Öffnung a, welche die Aussenluft mit dem Innern verbindet, nimmt den Druck auf, er wird durch Vermittlung eines Gummischlauches, welcher das andere Ende der Sonde mit einem Manometer (Toepler'sche Drucklibelle, siehe Fig. 21) verbindet, auf dessen Skala abgelesen.

Offenbar lässt hier die Kleinheit des Sondenkopfs nichts zu wünschen übrig, da dieser sozusagen das Ende einer feinen Nadel darstellt. Ich gebe ihr deshalb den Namen „Nadelsonde".

Ich will nun zeigen, wie diese Nadelsonde zur Messung des statischen Drucks und der Geschwindigkeit, nach Richtung und Grösse, benutzt werden kann:

Zu diesem Zwecke habe ich die Sonde in einen Luftstrom, in welchem der statische Druck Null war[1]), mit der Nadel senkrecht zur Stromrichtung gehalten, und habe dann, indem die Nadel um ihre feste Axe gedreht wurde, der Messöffnung *a* verschiedene Stellungen um diese gegeben, und jedesmal den zugehörigen Manometerdruck abgelesen.

Wenn man nun diese Resultate graphisch darstellt, indem man, wie es zuerst *Krell* jun. tat[2]) einen beliebigen Kreis *O* als Nullkreis (Manometerdruck = 0) und die Projektion der Sondenaxe als Kreismittelpunkt annimmt und dann die entsprechenden Manometerdrucke als Radien auf diesen Kreis aufträgt, die positiven Drucke (Überdrucke) ausserhalb, die negativen (Unterdrucke) innerhalb des Kreises, so erhält man, durch Verbindung aller Scheitelpunkte, eine geschlossene Kurve A (von *O. Krell* Nullkreis-diagramm genannt), welche die Resultate recht übersichtlich darstellt.

Fig. 12a stellt ein derartiges Diagramm für meine Nadelsonde dar. α stellt jeweils den Neigungswinkel dar, welchen die Axe der Messöffnung a, mit der Windrichtung bildet.

Man sieht, dass bei der Neigung $\alpha = 0$ der Überdruck seinen grössten Wert hat. Dieser ist im Diagramm als Maasstab für die anderen Drucke = 1 angenommen.

---

[1]) Ich werde im folgenden auf die Feststellung des statischen Drucks ausführlich zurückkommen.

[2]) O. Krell jun., l. c.

Bei $\alpha = 44^0$ ist der Druck Null. Von da ab sind Unterdrucke vorhanden, und zwar ist bei $\alpha = 85^0$ der Unterdruck am grössten $= 1{,}22$. Dann nimmt er rasch wieder ab bis bei $\alpha = 120^0$, bleibt fast konstant $= 0{,}93$ bis bei $\alpha = 150^0$ und fällt dann wieder bis $\alpha = 180^0$, wo er seinen kleinsten Wert $= 0{,}85$ erreicht.

Ich habe durch Versuche nachgewiesen, dass die Windgeschwindigkeit innerhalb der von mir untersuchten Grenzen von $V = 1$ bis $V = 10$ m/s keinen merklichen Einfluss auf die Verhältniswerte der Drucke ausübt, die absoluten Werte der Drucke sind aber dem Quadrat der Luftgeschwindigkeit proportional.

Fig. 12 b stellt dieses Diagramm der Drucke für zwei verschiedene Windgeschwindigkeiten $V = 4$ und $V = 6$ m/s dar.

Ich habe ferner durch Versuche nachgewiesen, dass diese Druckverteilung fast unabhängig von der Grösse der Messöffnung ist. Zu diesem Zweck habe ich an einer Nadelsonde von 1,6 mm äusserem Durchmesser zuerst eine sehr kleine Messöffnung a (von 0,2 mm) angebracht und probiert, die Öffnung nachher auf 0,4 mm vergrössert, ohne den geringsten Einfluss wahrnehmen zu können. Erst als ich den Durchmesser von a auf 0,6 mm erweiterte, zeigte sich eine kleine Abweichung, welche dann, als ich die Öffnung a auf 0,8 mm vergrösserte, ziemlich bedeutend wurde; zwar behielt noch immer bei $\alpha = 0$ der Überdruck seinen alten Maximalwert, aber bei $\alpha = 44^0$ war der Nulldruck sehr unbeständig, und bei $\alpha = 85$ war der Maximal-Unterdruck viel kleiner als 1,22, und sehr schwer zu bestimmen, wegen der Unbeständigkeit der Manometer-Angaben.

Ich habe auch den Einfluss des Durchmessers der Nadelsonde untersucht, indem ich ein Rohr von 2,5/1,5 statt 1,6/1 (grobe Nadel) ausprobierte. Die Messöffnung a hatte dabei einen Durchmesser von 0,4 mm. Der Maximal-Überdruck bei $\alpha = 0$, war genau derselbe wie bei der feinen Nadelsonde, (bei gleicher Windgeschwindigkeit), aber der Nulldruck zeigte sich bei $\alpha = 41^0$ und der Maximal-Unterdruck bei $\alpha = 83^0$ welcher dann 1,28 (statt 1,22) betrug.

Bei $\alpha = 180^0$ war in diesem Falle der Unterdruck $= 0{,}96$ (statt 0,85).

Was nun den absoluten Wert des Maximal-Überdrucks, bei $\alpha = 0$ und beim statischen Druck 0, anbelangt, so ist derselbe, nach den Versuchen, welche ich weiter unten schildern werde, ausgedrückt durch die Geschwindigkeitshöhe also durch den Druck einer Flüssigkeitssäule, von demselben spezifischen Gewicht, wie die strömende Luft, deren Höhe durch die, dieser Geschwindigkeit entsprechenden Fallhöhe:

$$H = \frac{V^2}{2g}$$

(H in Meter, V in m/s, $g = 9{,}81$) gegeben ist. Also wenn p_d diesen Maximal-Überdruck (dynamischer Druck) bei $\alpha = 0$, in Millimetern Wassersäule bezeichnet, so ist

$$p_d = \delta \frac{V^2}{2g}$$

wobei δ das specifische Gewicht der strömenden Luft bedeutet (δ in Kg pro Cbm., V in m/s, $g = 9{,}81$).

Schon *O. Krell* jun. [1]) hatte diesen Maximaldruck (für $\alpha = 0$) bei der Pitot-Röhre, und bei der *Recknagel*'schen Stauscheibe genau gemessen. Er fand denselben Wert wie ich bei meiner Nadelsonde, und zwar kam es bei der Pitot-Röhre nicht auf ihren Durchmesser an, ebenso war es gleichgültig, ob die Röhre zylindrisch-konisch zugespitzt, oder trichterförmig erweitert endete, wenn nur der abgebogene Schenkel nicht allzu kurz, also etwa nicht kürzer als der Rohrdurchmesser (siehe Figuren 13 a, b, c.) gehalten wurde.

Beim ersten Versuch habe ich, mich auf die Versuche *Krell's* stützend, neben meine Nadelsonde, eine fein zugespitzte Pitot-Röhre in den Luftstrom gehalten, indem jede der beiden Sonden mit je einem Schenkel eines Differentialmanometers (Toepler's Drucklibelle) verbunden waren.

Bei der Neigung $\alpha = 0$ für beide Sonden, war gar kein Druckunterschied wahrzunehmen; somit zeigen bei $\alpha = 0$ beide Sonden denselben Maximal-Überdruck.

Der andere Versuch ist noch interessanter, und giebt, unabhängig von den *Krell*'schen Resultaten, direkt den Wert des Überdrucks bei $\alpha = 0$ an:

[1]) O. Krell jun., l. c.

Aus einer runden Öffnung B (Durchm. = 60 mm) in dünner Wand einer Druckluftkammer A (siehe Fig. 14) fliesst ein Luftstrom. In einiger Entfernung, etwa 200 mm von der Ausflussöffnung B, steht eine runde Scheibe EE, von 80 mm Durchm., auf welche der Luftstrom senkrecht auftrifft. Im Innern der Druckkammer A befindet sich eine Sonde R (Nadelsonde oder auch Pitot-Röhre) welche mit einem Schenkel des Differentialmanometers (Drucklibelle) verbunden ist, und so den statischen Druck im Innern der Kammer aufnimmt. Dort kann die Luftgeschwindigkeit vernachlässigt werden, da sie sehr klein, im Vergleich zu der Ausflussgeschwindigkeit ist).

Bringt man nun eine Nadelsonde in den Luftstrom, die Messöffnung a dem Strom entgegengekehrt, und verbindet diese Sonde mit dem anderen Schenkel des Differentialmanometers, so zeigt das letztere keinen Druckunterschied an, also ist Gleichgewicht zwischen beiden Drucken vorhanden.

Man kann ausserdem mit der Sonde langsam den geradlinigen Weg von B bis D den Mittelpunkt der Scheibe verfolgen, und wird wahrnehmen, dass das Manometer immer in derselben Gleichgewichtsstellung verharrt.

Es kommen aber doch längs der Strecke von B bis D alle Druck- und Geschwindigkeitsverhältnisse vor; in B z. B. ist die Maximalgeschwindigkeit noch nicht erreicht, diese steigert sich bis in C, wo die Kontraktion des Stromes, wegen des Ausflusses aus dünner Wand am grössten ist. Dann von C bis etwa C' verläuft die Geschwindigkeit konstant; in C' bei ungefähr dem anderthalbfachen des Scheibendurchmessers vor der Scheibe beginnt, wegen der Stauung, die Verzögerung der Geschwindigkeit, und dauert an bis im Punkt D (Scheibenmitte) die Geschwindigkeit *Null* wird[1]). Aus diesem Versuche können folgende Schlüsse gezogen werden:

Erstens: dass die Verwandlung der potentiellen Energie im Innern der Kammer in kinetische von C' bis D ohne merk-

[1]) Dass beim Scheibenmittelpunkt die Geschwindigkeit bis auf Null gesunken ist, beweist der Umstand, dass dort die Nadelsonde beliebig um ihre Achse gedreht werden kann, ohne dass das Manometer beeinflusst wird.

lichen Verlust durch Reibung stattfindet (wegen der Kleinheit der Strecke A D).

Zweitens: Dass der von meiner Nadelsonde angezeigte dynamische Druck p_d der durch die Geschwindigkeit allein verursacht wird, genau gleich dem statischen Druck P ist, welcher diese Geschwindigkeit hervorgebracht hat.

Es ist somit bei meiner Nadelsonde ebenso wie bei der Pitot-Röhre, oder bei der *Recknagel'*schen Stauscheibe, mit welcher ich diesen Versuch wiederholte beim Neigungswinkel $\alpha = 0$, und beim statischen Druck $P = 0$, der angezeigte dynamische Druck darstellbar durch

$$p_d = \delta \frac{V^2}{2g}$$

c) Die Verwendung und Aichung der Sonde.

Im Vorhergehenden habe ich das Diagramm der dynamischen Drucke p_d, welche beim Drehen der Nadelsonde um ihre Achse angezeigt werden, gegeben (Fig. 12).

Es wurde dabei vorausgesetzt, dass der benutzte Luftstrom an der Stelle, wo der Sondenkopf sich befand, den statischen Druck Null besässe.

Wäre indessen dort der statische Druck nicht Null, sondern etwa $= P$ gewesen, so wären die Angaben anders ausgefallen, indem zu sämtlichen Werten des Druckes noch die constante Grösse P zu addieren gewesen wäre. Es hätte z. B. dann die Nadelsonde bei der Neigung $\alpha = 44^0$ nicht mehr den Druck Null, sondern den Druck P, also den statischen Druck, angezeigt.

Wenn also einmal die Nadelsonde richtig geaicht ist, so kann sie, wie man sieht, zur direkten Anzeige des statischen Drucks benützt werden, indem man ihr dann bloss die Neigung $\alpha = 44^0$ zur Stromrichtung zu geben braucht; in dieser Stellung wird sie dann direkt den statischen Druck anzeigen.

Viel besser ist es aber, wenn man die beiden symmetrischen Sondenneigungen, welche den Winkel $2 \times 44 = 88^0$ miteinander einschliessen, aufsucht, bei denen derselbe Druckwert angezeigt wird. Dieser ist dann der gesuchte statische Druck im betreffenden Punkt des Feldes.

Gleichzeitig ist auch die gesuchte Richtung der Geschwindigkeit durch die Mittellinie zwischen beiden Sondenrichtungen gegeben, die Grösse der Geschwindigkeit kann dann durch Ablesung des Druckes p_v in der mittleren Stellung (Messöffnung gegen den Wind schauend) leicht berechnet werden; es ist nämlich, wie schon gezeigt wurde

$$p_v = P + \delta \frac{V^2}{2g}$$

woraus folgt:

$$V = \sqrt{\frac{2g}{\delta}(p_v - P)}$$

wobei P, als schon ermittelt, bekannt ist.

(V in m/s, p_v und P in mm Wasserhöhe, δ in Kg pro cbm, g = 9,81).

Es sei noch erwähnt, dass die Pitot-Röhre ein ähnliches Verhalten zeigt, nur mit dem Unterschiede, dass dann $\alpha = 62^1/_2{}^0$ ist.[1])

Wie man sieht, hängt also der ganze Wert der Angaben meiner Nadelsonde und überhaupt jeder anderen ähnlichen Sonde von ihrer einmaligen, genauen Aichung ab, d. h. von der einmaligen, anfänglichen Feststellung des Winkels α, bei welchem sie den Druck Null anzeigt, wenn sie in einen Luftstrom vom statischen Druck Null gebracht wird.[2])

Bemerkung:

Es gibt noch ein zweites indirektes Verfahren, den statischen Druck und die Geschwindigkeit mit der Sonde zu ermitteln. Dabei macht man zwei Ablesungen des Manometers, nämlich eine beim Winkel $\alpha = 0$ (Messöffnung dem Luftstrom zugekehrt), die andere bei $\alpha = 180^0$ (Messöffnung in entgegengesetzter Richtung schauend). Es seien p_v und p_r diese beiden Ablesungen, nämlich p_v der Luvdruck und p_r der Leedruck, dann ist, wie schon bemerkt wurde, das Verhältnis $\frac{p_r}{p_v} = C$ eine, für die Sonde charakteristische Kon-

[1]) Der Wert $\alpha = 62^1/_2{}^0$ ist von O. Krell jun. angegeben. — Ich habe durch meine Versuche denselben Wert gefunden.

[2]) Es sei in Erinnerung gebracht, dass dieser Winkel α wo Nulldruck angezeigt wird, von der Grösse der Luftgeschwindigkeit unabhängig ist.

stante, welche von der Stromgeschwindigkeit nicht abhängt. Dieses Verhältnis C war z. B. bei der von mir verwendeten Nadel-Sonde: $C = 0{,}85$.

Es besteht nun die erste Ablesung einerseits aus dem dynamischen Druck p_d, welcher wie schon gezeigt wurde, sich ausdrücken lässt durch

$$p_d = \delta \frac{V^2}{2g}$$

zu diesen addiert sich noch der statische Druck P dieser Feldregion.

Es ist also

$$p_v = \delta \frac{V^2}{2g} + P$$

Die zweite Ablesung p_r besteht einerseits aus dem dynamischen Unterdruck (negativer Wert), welcher dieser Sondenrichtung zukommt, und welcher ausgedrückt werden kann durch

$$-C\, p_d \text{ also} = -C\, \delta \frac{V^2}{2g}$$

zu diesem kommt noch der statische Druck P hinzu.

Es ist also

$$p_r = -a\, \delta \frac{V^2}{2g} + P$$

Aus diesen zwei Gleichungen, welche p_v und p_r ausdrücken, folgt das gesuchte Resultat:

$$V = \sqrt{\frac{\delta (1+C)}{2g}\, p_v - p_r}$$

Luftgeschwindigkeit, in jenem Punkt des Feldes.

$$P = \frac{C\, p_v + p_r}{1 + C}$$

Statischer Druck, in jenem Punkt des Feldes.

Dieses zweite Verfahren kann zugleich neben dem ersten verwendet werden; es dient dann als Kontrolle für die Genauigkeit der Ablesungen.

Indessen ist das erste Verfahren bei Messungen dicht an der Oberfläche eines Körpers zuverlässiger, und daher vorzuziehen,

weil dort die Leeseite des von der Sonde erzeugten Feldes, durch die Nachbarschaft des Körpers mehr oder weniger gestört wird, und daher die Angabe bei $\alpha = 180^0$ ebenfalls und somit auch das sonst konstante Verhältnis C eine Störung erleiden könnte.

Man muss somit um die Aichung vorzunehmen, zuerst in der Lage sein, unterscheiden zu können, an welcher Stelle eines gegebenen freien Luftstroms der statische Druck Null ist.

So ist es z. B. nicht sicher, dass ein aus einer Düse oder einem zylindrischen Rohr ins Freie ausfliessender Luftstrom, in seiner ganzen Länge den statischen Druck Null besitzt.

Vielmehr zeigen alle, den statischen Druck messenden Instrumente (*Ser*'sche Scheibe, Sonden von *H. Zickendraht*, von *Nipher, Prandtl* u. s. w.), dass der statische Druck nicht an allen Stellen genau derselbe ist.[1])

Alle diese Messinstrumente bedürfen also, um genaue, zuverlässige, absolute Angaben zu liefern, einer genauen Aichung in einem Felde von bekanntem, statischem Druck.

Es drängt sich jetzt vor allem die Frage auf: Wie kann man in einem freien Luftstrom eine Stelle erkennen, von der mit Gewissheit behauptet werden kann, dass an ihr der statische Druck Null sei?

Diese Frage streng zu beantworten ist schwer. Die einzige Methode, die mir bekannt ist und welche erlaubt, den statischen Druck in einem geradlinigen, homogenen Luftstrom zu messen, beruht auf dem Prinzip der dünnen Scheibe. Dieselbe wurde zuerst von „*Ser*" angewandt[2]) und später von *Prandtl*[3]), wenn auch in anderer Form benutzt.

Dabei wurde von diesen Forschern stillschweigend angenommen, dass eine sehr dünne Scheibe, eine scharfrandige Platte oder dergleichen, deren Ebene in der Stromrichtung liegt, so dass

---

[1]) Die Art der Erzeugung des Luftstroms spielt eine grosse Rolle. Z. B. haben Luftströme von Schrauben-Ventilatoren immer einen helicoïdalen Verlauf, also Drehbewegung, und daher Unterdruck in der Strömungsachse, sogar die durch Centrifugal-Ventilatoren erzeugten Luftströme neigen zur Drehbewegung, was von O. Krell jun. nachgewiesen wurde (siehe O. Krell jun., l. c.). Aber auch unabhängig von der Drehbewegung kommen in einem Stromquerschnitte bei gleichem Abstand von der Strom-Achse Druckunterschiede vor, wie ich festgestellt habe.

[2]) Ser, l. c.

[3]) Prandtl, l. c.

die Stromlinien von ihr möglichst wenig abgelenkt werden, keinen dynamischen Druck erleidet, und folglich nur den reinen statischen Druck anzeigen wird.

Zur Messung des statischen Druckes braucht deshalb bloss ein sehr kleines Loch in dieser Scheibe, am besten in deren Mitte, angebracht, und dieses mittels einer feinen Röhre in Verbindung mit der Drucklibelle gebracht zu werden.

Statt einer Scheibe hat *Prandtl*[1]) als Drucksonde auch die Röhre verwendet, welche ich schon beschrieben habe (siehe Fig. 6).

d) Betrachtungen über die Scheiben-Methode.

Eine unendlich dünne Scheibe, gegen die Luft in der Stromrichtung orientiert, würde, wenn keine Reibung existierte, gar keine Ablenkung der Stromlinien verursachen, und könnte daher keinen dynamischen Druck senkrecht zur Fläche hervorrufen. Eine solche Scheibe würde also jedenfalls genau den statischen Druck angeben. Da aber Oberflächenreibung vorhanden, so bewirkt diese eine Verzögerung der Geschwindigkeit in der Nähe der Scheibenoberfläche, so dass die Stromlinien längs derselben nicht mehr ganz paralell zur Scheibenoberfläche verlaufen, also in langgezogenen Kurven sich von ihr etwas entfernen. (siehe Fig. 15).

A B stellt die Scheibe, 0, 1, 2, 3 ... 9 die Stromlinien dar. Am stärksten ist die Verzögerung der Geschwindigkeit am Anfang A (beim Eintritt) der Scheibe, weil dort die erste Luftschicht 0 fast plötzlich in A zum Stillstehen gebracht wird, und dadurch die anderen, nächstgelegenen, 1, 2 u. s. w. ebenfalls Verzögerungen erleiden.

Die Stromlinien erweitern sich daher am raschesten am Anfang, bei A, am wenigsten am Ende, bei B, weil die Verzögerung inzwischen abgenommen hat; daher stellen sie Kurven dar, die ihre konkave Seite der Scheibe zuwenden.

Wenn man nun von einem beliebigen Punkt *b* der Scheibe ausgehend, sich immer senkrecht zu den Stromlinien bewegt, bis zu einer ungestörten Region β des Feldes, in welcher der statische Druck Null ist, so wird, wegen der Krümmung der Stromlinien, der statische Druck von α bis β infolge der Wirkung der Centri-

[1]) Prandtl, l. c.

fugalbeschleunigung der Luftteilchen zunehmen, und da der statische Druck in β Null ist, so muss er in Punkt b, bei der Scheibe, negativ sein.

Die Krümmung der Stromlinien längs der Scheibe nimmt nun stets ab, weil, wie schon bemerkt wurde, die Verzögerung der Geschwindigkeit ebenfalls abnimmt, was dann auf die Stromlinienabstände wirkt, sodass, z. B. wenn die Scheibe sehr gross wäre, die Stromlinien bei ihrem Austritt in B fast der Scheibe paralell und gradlinig verlaufen würden.

Es ist daher die Wirkung der Centrifugalkraft, und somit auch der Unterdruck an irgend einem Punkte b der Scheibe, am grössten beim Eintritt A der Scheibe; er wird um so kleiner, je grösser die Entfernung des Punktes b vom Eintrittsrande A ist. Wenn also zur Messung des statischen Drucks, an einer Stelle eines gradlinigen Feldes, wo in Wirklichkeit der statische Druck Null ist, eine Scheibe verwendet wird, so wird dieselbe nicht Nulldruck, sondern Unterdruck anzeigen, also eine falsche Angabe machen. Bei Verwendung kleiner Scheibendurchmesser muss, nach dem vorher gesagten, der gemessene Unterdruck grösser, bei sehr grossen Scheibendurchmessern hingegen sehr klein ausfallen. Es war also notwendig, durch direkte Versuche mit Scheibensonden von sehr verschiedenen Durchmessern festzustellen, ob wirklich die Angaben des statischen Druckes merklich von einander verschieden sind. Wäre dies der Fall, so wäre es schwer festzustellen, bis zu welchem Scheibendurchmesser man gehen müsste, um zuverlässige Angaben zu erhalten.

Wenn aber die Angaben der grossen und kleinen Scheiben identisch sind, so darf man daraus den Schluss ziehen, dass die durch Oberflächenreibung verursachten fehlerhaften Angaben der Scheibensonde so gering sind, dass dieselben innerhalb der Beobachtungsfehlergrenze liegen, und daher vernachlässigt werden können.

Ich habe nun diesen Versuch mit 2 Scheibensonden gemacht, die eine hatte 25 mm, die andere 60 mm Durchmesser. Beide wurden nacheinander an denselben Ort des Feldes gebracht, und es wurde mehrere Male hintereinander der statische Druck mit beiden gemessen.

Die Angaben beider Scheiben stimmten genau überein!

Es sei noch erwähnt dass die Grösse der Messöffnung, in der Scheibenmitte, keinen Einfluss auf die Resultate hatte.

Ich kann also annehmen, dass hier die Oberflächenreibung vernachlässigt werden darf, und dass die experimentelle Ermittlung des statischen Druckes in einem parallelen und homogenen Luftstrom, am zuverlässigsten nach der Methode der dünnen Scheibe der Scheibensonde geschehen kann.

Deshalb habe ich ausschliesslich nur diese Methode zur Aichung meiner Nadelsonde benützt.

Um die Aichung meiner Nadelsonde vorzunehmen, musste ich zunächst im Luftstrom, welcher mir zur Verfügung stand und welcher im Freien verlief, eine Stelle auswählen, an welcher der statische Druck Null oder wenigstens der Grösse nach bekannt war. Dazu bediente ich mich, wie schon gezeigt, der Scheibensonde (verbesserte *Ser*'sche Scheibe). Fig. 16 stellt diese Scheibe S dar; ihr Durchmesser war 25 mm, die Dicke war 0,4 mm, der Rand war messerscharf geschliffen.

Die Messöffnung *a* hatte 0,3 mm, die Zuleitungsröhre H, H 2,5 mm Durchmesser. Diese letztere war so geformt, dass die Verlängerung der Achse des geraden Teils H in der Scheibenebene lag.[1]) Dieser gerade Teil H diente als Drehachse, um die Scheibe genau um 180° zu drehen (die zweite Lage ist punktiert angegeben).

Zu diesem Zweck war die Achse H in einem festen Lager angeordnet und trug am anderen Ende einen Zeiger, welcher über einer eingeteilten festen Scheibe beweglich war, und so das Ablesen der Drehungswinkel der Scheibe erlaubte.

Um nun im Luftstrom die Stelle, an welcher der statische Druck Null war, aufzufinden, wurde die Scheibe in den Strom mit der Achse H senkrecht zur Stromrichtung gehalten, und wurden ihr jedesmal nacheinander zwei, um 180° um die Achse verdrehte Stellungen erteilt, bis man zwei solche herausgefunden hatte, bei denen der angezeigte Druck denselben Wert hatte; dies war dann der statische Druck an der betreffenden Stelle.

---

[1]) Schon O. Krell jun. hatte diese Rohrform verwendet (vergl. O. Krell jun., l. c.).

War dieser nicht Null, so musste eine andere Stelle des Luftstroms untersucht werden, bis man eine solche mit Nulldruck herausgefunden hatte.

Dann erst begann an dieser Stelle die Aichung der Nadelsonde.

Dazu wurde dieselbe senkrecht zur Stromrichtung, ihr Kopf an der betreffenden Stelle des Feldes, gebracht. Die Nadel war um ihre Achse drehbar festgelagert, und mit Zeiger und fester Kreiseinteilung wie vorher die Scheibensonde versehen.

Die Messöffnung *a* der Sonde wurde dann zunächst dem Winde zugewandt, wobei das Manometer den Maximal-Überdruck angab. Dann wurde die Sonde soweit um ihre Achse gedreht, bis der angezeigte Druck Nullwert hatte. (Die Figur 17 zeigt den Querschnitt der Sonde an der Stelle der Messöffnung *a*).

Die so ermittelte Lage ist vollgezeichnet angegeben. Sodann wurde die Sonde um ihre Achse in die andere zur Windrichtung gegen die Messöffnung symmetrischen Lage gedreht, diese Richtung ist punktiert angegeben, wobei das Manometer abermals den Druck Null anzeigte.

Der zwischen beiden Richtungen eingeschlossene Drehungswinkel 2β stellt den doppelten Wert des gesuchten Neigungswinkels β dar, bei welchem die Nadelsonde den statischen Druck im Luftstrom anzeigt.

Auf diese Weise geaicht ergab die von mir verwendete Nadelsonde den Winkel $\beta = 44^0$.

Schliesslich bleibt noch das konstante Verhältnis *C* zwischen den dynamischen Drucken bei $\alpha = 0$ und $\alpha = 180^0$ zu ermitteln, was diese beiden zugehörigen Manometer-Ablesungen leicht ergeben.

Ihr Verhältnis stellt dann den Wert des gesuchten Koefficienten *C* für die Sonde dar, welcher von der Luftgeschwindigkeit unabhängig, für verschiedene Sonden aber verschieden ist.

e) Beschreibung der gesamten Messvorrichtung mit Nadelsonde.

Die Sonde selbst ist in Figur *18a* dargestellt. Sie besteht aus der schon besprochenen 100 mm langen, feinen Stahlröhre

A B, (Messöffnung in a) von einem äusseren Durchmesser von 1,6 mm; um eine Durchbiegung zu vermeiden, ist sie durch eine stärkere Röhre B C verlängert. Letztere hat einen Aussendurchmesser von 3 mm und steht durch einen Gumischlauch C' mit einem empfindlichen Manometer in Verbindung (Fig. 21).

Die von mir benutzte *Töpler*'sche Drucklibelle gab jeden Millimeter Wasserdruck durch eine Verschiebung von 6,8 mm auf der Skala an.[1])

Auf der Röhre B C ist noch ein kleiner Stellring E befestigt, neben welchem die Röhre von einer kleinen Bremse *e* umklammert ist. Diese Bremse, welche in Fig. 18 b gesondert dargestellt ist, hat eine wagerechte Lage, und wird durch einen, am Schlitten G befestigten Stift e_1 am Mitdrehen verhindert. Sie hat den Zweck, das Verstellen der Sonde zu verhüten, welches sonst unter Einwirkung des mitverdrehten Gummischlauch's leicht eintreten kann.

Andererseits ist noch ein Zeiger D auf diesem Rohr befestigt und zwar durch Vermittlung der Klemme *d*, an welche er angelötet ist, und welche zugleich als Gegengewicht wirkt.

Die Figuren 19a und 19b stellen die Vorder- und Seitenansicht in etwa halber Naturgrösse dar.

Die Sondenröhre C B A ist um ihre Achse drehbar angeordnet, indem ihr rohrartiges Lager F F' am Vertikalschlitten G G befestigt ist.

Dieser Schlitten G G bildet einen Teil des Koordinaten Apparats.

Dieser ist in Fig. 20 a und 20 b, in Vorder- und Seitenansicht dargestellt.

Die Vertikal-Verschiebungen (Ordinaten) werden an der Säule Q, welche eine Einteilung besitzt, abgelesen, während die Horizontalverschiebungen (Abszissen), auf der Skala P P, welche den Horizontalschlitten trägt, abgelesen werden.

Auf der Sondenachse Fig. 19 befindet sich noch eine in 360° eingeteilte, feste Kreisscheibe H, welche am Lager F F' befestigt ist. Diese dient zur Messung der Neigungswinkel der Sonde.

---

[1]) Diese Skala war mit Millimeter-Einteilung versehen, so dass ein Skalenteil einem Wasserdruck von 0,147 mm Höhe entsprach.

Ebenfalls auf der Sondenröhre centriert, sitzt die lose Scheibe I (Fig. 19 und Einzelbild in Fig. 18 c) welche durch eine sternförmige Flachfeder M (Fig. 18 d) leicht gegen die feste Scheibe H H gepresst wird, damit durch die so entstehende schwache Bremsung der losen Scheibe I, ihr Verstellen, beim Drehen der Sonde, verhindert werde.

Diese Scheibe hat den Zweck, die Beobachtungen und Winkelablesungen auf der festen Kreisscheibe zu erleichtern, sie ermöglicht raschere und zuverlässigere Arbeit, und trägt keine andere Einteilung als drei radiale Striche K, L und K', welche zwei Mal denselben Winkel β (bei welchem die Sonde den statischen Druck anzeigt) einschliessen. (Bei der von mir verwendeten Nadelsonde war $\beta = 44^0$, daher waren die Winkel KOL = K'OL $\beta = 44^0$.

f) Verwendungsweise der Nadelsonde

als Beispiel: Feld einer Kreisscheibe.

Ich nehme als Beispiel die Bestimmung des aërodynamischen Feldes, welches von einer, von einem freien Luftstrom senkrecht getroffenen Kreisscheibe herrührt. (siehe Fig. 22).

Es handelt sich also um die Bestimmung des statischen Druckes und der Luftgeschwindigkeit, nach Grösse und Richtung in einem beliebigen Punkte des Feldes.

Ich nehme an, die Richtung des freien ungestörten Luftstroms sei horizontal, sodass die senkrecht getroffene Scheibe v e r t i k a l steht. Da hier das Feld in Bezug auf die Scheibenachse symmetrisch ist, so kann man sich damit begnügen, einen Längsschnitt dieses Feldes, in einer Vertikalebene durch die Scheibenachse zu untersuchen. Es ist dieser Schnitt in Figur 22 dargestellt.

Man kann hier zweckmässig als Ursprung des Kordinaten-Systems, den Scheibenmittelpunkt O auf der Vorderfläche, die Scheibenachse OX als Abszissenachse, und die Senkrechte OY als Ordinatenachse wählen.

Nun soll ein beliebiger Punkt U des Feldes, dessen Koordinaten x und y durch Ablesung an den Skalen des Koordinaten-Apparats bestimmt sind, mit der Nadelsonde untersucht werden.

Handhabung der Sonde:

Zunächst muss die Sonde mittels des Zeigers D um ihre Achse (in U) gedreht werden, sodass die Messöffnung *a* derselben dem Strom entgegenschaut, welche Stellung durch Beobachtung am Manometer leicht daran erkennbar ist, dass in diesem Falle der grösste Druck angezeigt wird.

Es sei p_v dieser Druck. In diese letztere Stellung des Zeigers D muss nun, durch Drehen der losen Scheibe I, deren mittlere Marke L eingestellt werden.

Sodann dreht man den Zeiger D, bis die Messöffnung der Sonde mit der Stromrichtung den Winkel $\beta = 44^0$ bildet, was einfach dadurch geschieht, dass man den Zeiger D auf die Marke K der losen Scheibe stellt. Man liest dann am Manometer den zugehörigen Druck ab. Ferner wird, mittels des Zeigers D, die Sonde in die andere, zur Stromrichtung symmetrisch gelegene Stellung gebracht, indem man den Zeiger D auf die Marke K' der Scheibe stellt. Es wird dann ebenfalls wieder am Manometer beobachtet.

Sind nun die zwei erhaltenen Drucke identisch, so ist der abgelesene Wert der gesuchte statische Druck P im Punkte U des Feldes.

Sollten die zwei Druckangaben nicht ganz identisch sein, so ist der abgelesene Wert der gesuchte statische Druck P im Punkte U des Feldes.

Sollten die zwei Druckangaben nicht ganz identisch sein, so muss die Stellung der losen Scheibe etwas korrigiert werden, und es beginnt in dieser corrigierten Stellung von neuem das Einstellen des Zeigers D auf die Marken K und K' der losen Scheibe, wobei das Manometer beobachtet wird.

Bei einiger Uebung erreicht man gewöhnlich die Gleichheit der Manometerangaben schon nach der ersten Korrektur der Scheibenstellung. Die gesuchte Richtung der Luftgeschwindigkeit im Punkt U ist dann durch die Stellung der mittleren Marke L der losen Scheibe gegenüber der festen in 360^0 eingeteilten Scheibe H angegeben.

Diese Ablesung stellt den Winkel α dar, welchen die Strömungsrichtung mit der Horizontalen im Punkte U bildet.

Somit kennt man nun für den Punkt U des Feldes folgende Grössen:

1. Den gesamten Maximaldruck p_v (dynamischer und statischer Druck zusammen).

2. Den statischen Druck P.

3. Die Richtung der Geschwindigkeit durch den Neigungswinkel α. Was nun die Grösse der Geschwindigkeit anbetrifft, so wird dieselbe aus der oben erwähnten Formel berechnet, nämlich:

$$V = \sqrt{\frac{2g}{\delta}(p_v - P)}$$

wo V in m/s p_v und P in mm Wasserdruck $g = 9{,}81$ und δ das spezifische Gewicht der Luft im Punkte U in kg pro cbm.

Es wären somit alle Bestimmungen für den betreffenden Punkt U des Feldes erledigt.

Bemerkung:

Es kann vorteilhaft sein, als Kontrolle für die Genauigkeit der Manometer-Ablesungen noch eine weitere Beobachtung anzustellen, und zwar diejenige p_r, bei welcher die Messöffnung *a* der Sonde in Richtung der Strömung schaut.

Dies geschieht, nachdem der Zeiger D der Sonde in die der mittleren Marke L entgegengesetzte Richtung gestellt worden ist.

Man kann jetzt, da p_r und p_v nunmehr bekannt sind, aus diesen Werten den statischen Druck P und die Luftgeschwindigkeit V berechnen, nämlich wie schon gezeigt worden:

$$P = \frac{C\,p_v + p_r}{1 + C}$$

und

$$V = \sqrt{\frac{2g}{\delta(1+C)}(p_v - p_r)}$$

wobei C das für die Sonde charakteristische konstante Verhältnis

$$C = \frac{p_r}{p_v}$$

darstellt.

Bei der von mir verwendeten Nadelsonde war C = 0,85. In der vorigen Formel ist V in m/s p_v und p_r in kg pro mg (oder in mm Wasser) g = 9,81, δ in kg pro cbm genommen.

Die so berechneten Werte des statischen Drucks P und der Luftgeschwindigkeit V sollten mit dem direkt beobachteten statischen Druck P und der anderseitig berechneten Geschwindigkeit V übereinstimmen, wenn die Manometerablesungen sämtlich genau waren.

Alle diese zur Bestimmung des Feldes im Punkte U nötigen Beobachtungen und Manipulationen, nehmen bei einiger Uebung kaum mehr als anderthalb Minuten in Anspruch. Die Berechnungen, welche nachträglich ausgeführt werden, erfordern noch eine Beobachtung des Barometerstandes und der Temperatur des Luftstroms, um das spezifische Gewicht δ der strömenden Luft berechnen zu können.

Zweiter Teil.

Messungen im aërodynamischen Felde einer Kreis-Platte.

Es soll das aërodynamische Feld einer dünnen Kreisplatte, welche senkrecht zur Stromrichtung steht, bestimmt werden.

Im vorher besprochenen Beispiel ist das Verfahren zur Bestimmung des statischen Drucks und der Geschwindigkeit nach Grösse und Richtung für einen beliebigen Punkt des Feldes ausführlich angegeben worden.

Es bleibt also bloss die gesamte Versuchsanordnung zu beschreiben übrig, damit dann die Ergebnisse meiner Messungen zunächst zahlenmässig dargestellt werden können.

Endlich soll, indem aus den Messungen der Stromrichtung in einer grossen Anzahl Punkte des Feldes auf graphischem Wege, die Form der Stromlinien ermittelt wurde, ein Bild dieses Feldes gegeben werden. Dieses ist in Fig. 25 dargestellt.

Dasselbe Bild zeigt auch noch die Verteilung des statischen Druckes, indem die Form der „Isobaren“ ebenfalls auf graphischem Wege aus den Zahlenergebnissen ermittelt wurde, ausserdem ist noch die Grösse der Geschwindigkeit an vielen Punkten des Feldes angeschrieben.

Die gesamte Versuchsanordnung ist in Fig. 23 verkleinert dargestellt.

Der Luftstrom wurde von einer vierflügeligen Luftschraube B B, welche durch einen kleinen elektrischen Motor C angetrieben war, erzeugt, und passierte das schwach konische Rohr F F, aus dessen Mündung G er ins Freie ausströmte.

Dicht hinter der Luftschraube B befand sich eine dünne Wand D, senkrecht zur Rohrachse, welche siebartig durchlöchert war (siehe auch Fig. 24a). Die Löcher waren in drei, zur Rohr-

achse konzentrischen Reihen a, b und c angeordnet, wobei die äussere Reihe a die kleinsten, die dritte c die grössten Löcher aufwies. Das Innere *d* der Scheibe war ganz offen, der Rand der Öffnung ausgezackt.

Dicht hinter dieser dünnen Wand D lag die Parallel-Richtvorrichtung E E; diese bestand aus zellenartig angeordneten Flächen (siehe auch Auszug in Fig. 24b).

Die Vorrichtung von Siebwand D und Zellenflächen E war unentbehrlich. Die Siebwand hatte den Zweck, eine gleichmässige Geschwindigkeitsverteilung über den ganzen Stromquerschnitt zu erzielen. Es zeigten sich nämlich, ohne die Siebwand, Unterschiede in den Luftgeschwindigkeiten, und zwar war die kleinste Geschwindigkeit in der Mitte (längs der Rohrachse). Diese steigerte sich von da ab auf unregelmässige Weise bis fast zur Rohrwand.

Die Zellenflächen E hatten den Zweck, die Luftgeschwindigkeit überall parallel zur Rohrachse zu richten. Ohne diese Vorrichtung nahmen die Stromlinien einen schraubenartigen Verlauf, was nicht verwunderlich ist, da sie von einer rotierenden Luftschraube ausgehen. Es erwies sich der aus der Rohrmündung G ins Freie fliessende Luftstrom beinahe als zylindrisch, schwach divergierend, und in seinem ganzen Querschnitt fast parallel gerichtet, mit praktisch gleichmässiger Geschwindigkeitsverteilung über den ganzen Querschnitt.

Der von mir als Feld benutzte Teil des Luftstroms erstreckte sich von der Mündung G G des Rohres bis zu einer Entfernung von 530 mm von derselben (Querschnitt L L). Die runde Platte S S, welche senkrecht zum Strome stand, war in einer Entfernung von 130 mm von dieser Mündung G eingestellt.

Die Wahl der Koordinatenachsen des Feldes bleibt hier dieselbe wie im vorigen Beispiel (Fig. 22).

Die Abszissenachse wird durch die Plattenachse selbst, die gleichzeitig auch Rohr- und Stromachse ist, gebildet, die Ordinatenachse ist durch eine vertikale, durch den Plattenmittelpunkt gehende Gerade dargestellt.

Der Koordinatenursprung liegt also im Zentrum der Platte.

Die Abszissen X, welche von der Platte aus in der Hauptwindrichtung verlaufen, d. h. diejenigen auf der Leeseite des Feldes,

sind als positiv, diejenigen von der Platte gegen den Wind, der Luvseite des Feldes als negativ angenommen.

Die Ordinaten Y sind oberhalb der X-Achse, also rechts von der Hauptstromrichtung, als positiv, diejenigen unterhalb derselben als negativ gerechnet.

Um die Richtung der Geschwindigkeit zu kennzeichnen, ist der Winkel α angegeben worden, welchen die zwei, im betrachteten Punkt des Feldes entspringenden Richtungspfeile, einschliessen, wobei einer der Pfeile die positive X Richtung, also die ursprüngliche Windrichtung, der andere die Geschwindigkeitsrichtung darstellt.

Dieser Winkel ist positiv genommen, wenn der zweite, die Geschwindigkeit V darstellende Pfeil oberhalb des ersten, die positive X Richtung zeigende Pfeil liegt, oder, wenn $\frac{dy}{dt}$ = positiv ist, wobei dy = Zunahme von y während eines Zeitelements längs der Laufbahn bedeutet.

Es sind somit z. B. die Rücklaufströme, in der Leeseite, deren Bahn wirbelförmig verläuft, von den normal (vorwärts) strömenden unterschieden, indem bei den ersteren α grösser als 90° ist (zwischen 90° und 180°), während bei den zweiten α zwischen 0 und 90° liegt.

Die Neigung zur X Achse ist übrigens noch durch das Vorzeichen von α unzweideutig gekennzeichnet.

Ich werde zunächst einige zahlenmässige Beispiele meiner Messungsergebnisse, wie dieselben, ohne jede Korrektur, sich direkt ergaben, wiedergeben; und zwar zunächst die Druck- und Geschwindigkeitsverteilung im freien, ungestörten Luftstrom, also ohne die Gegenwart der Platte. Diese sind in Tabelle I und II enthalten.

Die Messungen sind in den beiden Endquerschnitten der als Feld betrachteten Strecke des Luftstroms gemacht worden, und zwar bei $x = -120$ mm und $x = +400$ mm.

Diese Feldstrecke beginnt somit bei 10 mm Entfernung von der Rohrmündung G, und endet bei der Entfernung $130 + 400 = 530$ mm von G. Man kann aus den Messungen in diesen zwei Endquerschnitten des ungestörten Stromes, den durch Reibung

längs dieser Strecke, gegen die ruhende Aussenluft verursachten Geschwindigkeitsverlust beurteilen, ebenso wie die damit verbundene Querschnittsvergrösserung des Stromes.

Ferner gebe ich noch, als Beispiel, die Messungen im Querschnitt wo $x = -20$ mmm, wobei aber die Platte sich im Luftstrom befindet. (Diese sind in Tabele III enthalten).

Schliesslich wird das zahlenmässige Ergebnis meiner sämtlichen Messungen im Felde der Platte angeführt, und da, wie man erwarten darf, und wie auch aus dem Beispiel Tafel III ersichtlich ist, die Ergebnisse in den beiden symetrischen Hälften des Feldes ziemlich dieselben sind, was ich übrigens in den meisten Querschnitten durch einige Messungen geprüft habe, so begnüge ich mich, die Resultate nur für die oberhalb der X Achse gelegene, symmetrische Hälfte der Feldquerschnitts zu geben, also für alle positiven Werte von y.

Diese Messungen beziehen sich auf 15 Feldquerschnitte, und sind in der Tabelle IV enthalten.

Da der Barometerstand bei meinen damaligen Messungen, welche einige Tage dauerten, ziemlich constant = 740 mm Quecksilber betrug, und da die Lufttemperatur im Versuchsraum nur wenig um 18° schwankte, so erhält man für δ den Wert:

$$\delta = 1{,}293 \frac{H}{760} \frac{1}{1+\alpha t} = 1{,}293 \frac{740}{760} \frac{1}{1+\frac{18}{273}}$$

also $\delta = 1{,}180$ Kg. pro cbm., so dass der Ausdruck

$$\sqrt{\frac{2g}{\delta}} = \sqrt{\frac{2+9{,}81}{1{,}180}} = 4{,}074$$

ergibt, wodurch obige Formel für die Luftgeschwindigkeit:

$$V = 4{,}074 \sqrt{p_v - P}$$

wird.

Es ist zur Berechnung der Luftdichtigkeit δ im betreffenden Punkt des Feldes nur der Barometerstand und die Temperatur des Versuchsraums verwendet worden; hingegen wurde der statische Druck P (Überdruck) im betrachteten Punkt des Feldes als verschwindend klein gegen den Barometerstand vernachlässigt, da P

niemals 2,5 mm Wassersäule überstieg, und somit P nur ungefähr $\frac{1}{4000}$ des Barometerdrucks betrug, so dass der Fehler in der so berechneten Geschwindigkeit nur $\frac{1}{8000}$ betragen konnte, was sehr wenig gegenüber den durch Schwankungen in der Ventilatorgeschwindigkeit verursachten Fehlern ist.

Aus demselben Grund habe ich, zur Berechnung der Luftgeschwindigkeiten V, den Rechenschieber verwendet, welcher eine Genauigkeit bis auf $\frac{1}{1000}$ gewährleistet, also unter Berücksichtigung der anderen möglichen Fehler hier anwendbar erscheint.

Es folgen nun die 4 Tafeln, welche alle direkten Messungen im Felde der runden Platte enthalten, nämlich für eine grosse Anzahl Punkte des Feldes (Koordinaten X und Y) die drei direkt gemessenen Grössen: Statischer Druck P Gesamtdruck $p_v =$ (Dyn. + stat. Druck) und Geschwindigkeitsrichtung (Winkel α), sowie die aus P und p_v berechnete: Luftgeschwindigkeit $V = 4{,}074 \sqrt{p_v - P}$

Tabelle I und II (ohne die Platte)

	Koordinaten		Ablesung des Manometers				Berechnung nach Formel $V = 4{,}074\sqrt{p_v \cdot P}$
			Gesamtdruck		Stat. Druck		
Tabelle I	X	Y	Weg auf der Skala	p_v	Weg auf der Skala	P	Geschwindigkeit V
Anfangsquerschnitt des Luftstroms	mm	mm	mm	mm	mm	mm	m/s
	— 120	0	17,75	2,61	0,95	0,14	6,40
	„	+ 20	17,6	2,59	0,8	0,12	6,40
	„	+ 40	17,15	2,52	0,8	0,12	6,32
	„	+ 60	17,15	2,52	0,75	0,11	6,34
	„	+ 80	17,33	2,55	0,55	0,08	6,40
	„	+ 100	17,5	2,57	0,27	0,04	6,47
	„	+ 120	17,33	2,55	0,14	0,02	6,47
	„	+ 124	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	„	— 20	17,6	2,59	0,80	0,12	6,40
	„	— 40	17,2	2,53	0,75	0,11	6,34
	„	— 60	17,1	2,51	0,60	0,09	6,35
	„	— 80	17,3	2,54	0,40	0,06	6,42
	„	— 100	17,4	2,55	0,30	0,04	6,47
	„	— 120	17,2	2,53	0,15	0,02	6,46
	„	— 124	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Tabelle II	mm	mm					
	+ 400	0	16,4	2,41	— 0,4	— 0,059	6,4
	„	+ 20	16,2	2,39	— 0,3	— 0,044	6,35
	„	+ 40	16,0	2,35	— 0,2	— 0,029	6,29
	„	+ 60	15,7	2,31	0	0	6,20
	„	+ 80	14,9	2,20	0	0	6,05
	„	+ 100	13,8	2,03	0	0	5,81
	„	+ 110	11,9	1,76	0	0	5,40
	„	+ 120	8,3	1,23	0	0	4,52
	„	+ 130	5,9	0,87	0	0	3,80
	„	+ 140	4,0	0,585	0	0	3,11
	„	+ 150	2,5	0,376	0	0	2,50
	„	+ 160	1,5	0,223	0	0	1,92
	„	+ 170	0,85	0,124	0	0	1,43
	„	+ 180	0,35	0,05	0	0	0,91
Endquerschnitt des benutzten Luftstroms	„	mm — 20	16,2	2,39	— 0,3	— 0,044	6,35
	„	— 40	16,1	2,37	— 0,2	— 0,029	6,30
	„	— 60	15,8	2,32	— 0,2	— 0,029	6,22
	„	— 80	15,1	2,22	0	0	6,07
	„	— 100	13,8	2,04	0	0	5,80
	„	— 110	11,9	1,76	0	0	5,40
	„	— 120	7,9	1,17	0	0	4,40
	„	— 130	5,65	0,83	0	0	3,72
	„	— 140	3,7	0,54	0	0	3,00
	„	— 150	2,4	0,35	0	0	2,42
	„	— 160	1,33	0,196	0	0	1,80
	„	— 170	0,7	0,103	0	0	1,30
	„	— 180	0,25	0,038	0	0	0,80

Tabelle III (Mit der Platte)

Koordinaten		Ablesung des Manometers				Richtung	Berechnete Geschw.
		Gesamtdruck		Stat. Druck			
X	Y	Weg auf der Skala	p_v	Weg auf der Skala	P	α	V
mm	mm	mm	mm	mm	mm	Grad	m s
— 20	0	17,0	2,5	14,1	2,07	0	2,67
„	+ 10	17,0	2,5	13,7	2,02	10,3	2,82
„	+ 20	17,0	2,5	13,3	1,95	20,5	3,01
„	+ 30	16,8	2,47	10,8	1,59	24,8	3,81
„	+ 40	16,8	2,47	8,0	1,17	24,8	4,65
„	+ 50	17,0	2,5	5,4	0,80	22,2	5,31
„	+ 60	17,2	2,52	3,0	0,44	17,5	5,88
„	+ 80	17,0	2,5	0,33	0,05	10,8	6,36
„	+ 100	17,1	2,51	0	0	6,8	6,43
„	+ 120	16,8	2,47	0	0	4,5	6,39
„	+ 130	16,9	2,48	0	0	3,9	6,40
	mm						
„	— 10	17,0	2,50	13,8	2,02	9,9	2,82
„	— 20	17,1	2,51	13,	1,91	19,9	3,16
„	— 30	17,2	2,52	10,8	1,60	23,8	3,90
„	— 40	16,8	2,47	7,9	1,17	23,8	4,65
„	— 50	16,7	2,46	5,1	0,75	20,8	5,32
„	— 60	16,8	2,47	3,	0,45	16,5	5,78
„	— 80	17,0	2,50	0,33	0,05	10,0	6,36
„	— 100	17,3	2,52	0	0	6,4	6,46
„	— 120	17,2	2,52	0	0	4,3	6,46
„	— 130	17,2	2,52	0	0	3,7	6,46

In grösserer Entfernung von der Ventilatormündung beginnt der Luftstrom sich in Stösse aufzulösen.

(Vergl. Langley: the internal work of the wind, etc. . . .)

Tabelle IV

Beobachtete Werte von p_v, P, α V berechnet

Luv-Seite der Platte

Abszissen		Ordinaten des Punktes 0 mm	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	130 mm
X = -120 mm	p_v mm	2,5	2,5	2,52	2,51	2,5	2,5	2,49	2,49	2,5	2,5	2,5	2,51	2,5
	P mm	0,28	0,276	0,285	0,258	0,23	0,20	0,157	0,124	0,10	0.05	0	0,01	0
	α Grad													
	V m/s	6,08	6,087	6,095	6,12	6,14	6,19	6,23	6,27	6,31	6,36	6,43	6,43	6,43
X = -60 mm	p_v	2,5	2,49	2,5	2,5	2,5	2,51	2,5	2,5	2,49	2,49	2,5	2,51	2,5
	P	0,90	0,87	0,84	0,74	0,58	0,46	0,32	0,2	0,15	0,05	0,02	0,01	0
	α	0	2	3,9	5,2	5,9	5	5,8	5	4,45	3,9	3,2	2,05	1,5
	V	5,16	5,185	5,235	5,39	5,64	5,83	6,02	6.19	6,25	6,35	6,40	6,43	6,43
X = -40	p_v	2,51	2,5	2,5	2,51	2,52	2,31	2,5	2,5	2,49	2,49	2,49	2,49	2,5
	P	1,41	1,31	1,18	1,06	0,92	0,71	0,5	0,32	0,17	0,09	0,02	— 0,01	0
	α	0	4	8	10,4	10,6	9,5	8,4	7,4	6,5	5,8	5	3,5	3
	V	4,26	4,45	4,68	4,90	5,16	5,46	5,75	6,02	6,21	6,31	6,39	6,43	6,43
X = -20	p_v	2,51	2,5	2,5	2,5	2,51	2,51	2,5	2,5	2,49	2,49	2,49	2,5	2,5
	P	2.08	2,02	1,93	1,6	1,21	0,81	0,45	0,18	0,04	— 0,01	— 0,01	0	0
	α	0	10.1	20,2	24,3	24,3	21,5	17,0	13,2	10,4	8,2	6,6	4,4	3,8
	V	2,67	2,82	3,07	3,86	4,65	5,31	5,83	6,21	6,36	6,43	6,43	6,43	6,43
X = -10	p_v	2,5	2,5	2,51	2,52	2,51	2,5	2,5	2,49	2,49	2,49	2,5	2,49	2,48
	P	2,48	2,41	2,26	1,82	1,29	0,83	0,45	0,18	— 0,01	— 0,09	— 0,13	— 0,14	— 0,12
	α	0	80	55	42,8	34	26,7	21	15,7	12	9,1	7,2	5	4,2
	V	0,54	1,24	2,03	3,4	4,5	5,26	5,83	6,2	6,43	6,54	6,61	6,61	6,57
X = -2	p_v	2,49	2,5	2,5	2,51	2,51	2,5	2,5	2,5	2,48	2,46	2,46	2,45	2,45
	P	2,49	2,48	2,4	2,02	0,31	— 0,05	— 0,19	— 0,25	— 0,30	— 0,30	— 0,31	— 0,21	— 0,11
	α	0	90	88	85	78	49	27,3	19,5	14	10,4	7,9	5,5	4,9
	V	0	0,54	1,30	2,87	6,05	6,5	6.69	6,76	6,77	6,76	6,76	6,65	6,58

Tabelle IV (Fortsetzung)

Lee-Seite der Platte	Abszissen													
		Y mm	0	20	30	40	42	45	50	60	80	100	120	130
	mm	p_v mm	— 0,81	— 0,81	— 0,81	— 0,81	2,5	2,5	2,5	2,48	2,45	2,45	2,45	2,43
	X = + 2	P mm	— 0,81	— 0,81	— 0,81	— 0,81	— 1,03	— 0,7	— 0,3	— 0,22	— 0,28	— 0,26	— 0,10	— 0,02
		α Grad					34	33	30,5	25	14,5	7,4	4,6	3,5
		V m/s	0	0	0	0	7,63	7,3	6,82	6,7	6,74	6,72	6,5	6,35
		Y	0	20		40		51	55	60	80	100	120	130
	X = + 20	p_v	— 0,82	— 0,77		— 0,81		— 0,30	1,30	2,5	2,5	2,5	2,46	2,4
		P	— 0,87	— 0,82		— 0,81		— 0,85	— 0,95	— 0,87	— 0,54	— 0,4	— 0,21	— 0,14
		α	180	140				23	22,2	20,8	12,3	6,3	4,7	2,2
		V	0,912	0,912		0		3,01	6,11	7,47	7,09	6,95	6,76	6,48
		Y	0	20	40	50	55	60	65	70	80	100	120	130
	X = + 40	p_v	— 0,89	— 1,05	— 1,20	— 1,2	— 0,88	0	1,10	2,48	2,5	2,5	2,45	2,45
		P	— 1,20	— 1,20	— 1,20	— 1,2	— 1,20	— 1,20	— 1,17	— 1,14	— 0,93	— 0,59	— 0,25	— 0,09
		α	180	160			14,3	15,3	14	12,8	9,9	5,2	2,5	1,6
		V	2,24	1,57	0	0	2,25	4,47	6,14	7,72	7,53	7,15	6,7	6,49
		Y	0	20		40	50	60	70	80	83	100	120	130
	X = + 80	p_v	— 0,74	— 1,33		— 1,7	— 1,7	— 1,22	1,02	2,21	2,49	2,49	2,45	2,45
		P	— 1,65	— 1,68		— 1,7	— 1,7	— 1,63	— 1,55	— 1,32	— 1,23	— 0,80	— 0,30	0
		α	180	174				— 2	— 0,6	0	0	0,15	0,30	0,20
		V	3,88	2,22		0	0	2,62	6,53	7,63	7,82	7,39	6,70	6,35
		Y	0	20	40	48	55	60	70	80	90	100	120	130
	X = + 120	p_v	— 0,6	— 0,93	— 1,33	— 1,33	— 0,90	— 0,35	0,85	2,10	2,47	2,48	2,48	2,43
		P	— 1,23	— 1,27	— 1,33	— 1,33	— 1,25	— 1,20	— 1,05	— 0,92	— 0,78	— 0,63	— 0,32	— 0,18
		α	180	180			— 20	— 16,5	— 10,2	— 6	— 4	— 3	— 1,3	— 0,9
		V	3,32	2,37	0	0	2,4	3,74	5,61	7,08	7,35	7,18	6,82	6,58

Tabelle IV (Schluss)

Lee-Seite der Platte	Abszissen														
	mm	Y mm	0	20	30	40	60	70	80	90	100	120	130		
		p_v mm	—0,40	—0,43	—0,40	—0,13	1,30	1,86	2,35	2,45	2,46	2,42	2,4		
	X = +160	P mm	—0,40	—0,43	—0,43	—0,43	—0,41	—0,39	—0,37	—0,33	—0,29	—0,15	—0,08		
		α Grad			—32,2	—33	—19,4	—14,1	—10	—7,3	—5,7	—4,1	—3,5		
		V m|s	0	0	0,66	2,22	5,32	6,11	6,72	6,80	6,7	6,52	6,4		
		Y	0	20	40	60	80	100	120	140					
		p_v	0,16	0,41	1,11	2,03	2,38	2,40	2,30	2,10					
	X = +200	P	0,16	0,16	0,14	0,03	—0,07	—0,10	—0,05	0					
		α		—23,7	—19,5	—14,3	—9,8	—6	—2,2	0					
		V	0	2,03	4,0	5,75	6,35	6,43	6,25	5,9					
		Y	0	20	40	60	80	100	120	140					
		p_v	1,03	1,25	1,59	2,03	2,16	2,05	1,70	1,20					
	X = +300	P	0	0	0	—0,02	—0,09	—0,09	—0,04	0					
		α	0	—1,5	—1,2	—0,8	—0,6	0	1,6	3,8					
		V	4,12	4,56	5,13	5,83	6,11	5,96	5,36	4,47					
		Y	0	20	40	60	80	100	120	140					
		p_v	1,45	1,65	1,87	2,07	1,92	1,47	0,80	0,45					
	X = +400	P	0	0	—0,03	—0,11	—0,18	—0,18	—0,10	—0,03					
		α	0	—1,3	—1	—0,6	0,4	0	1,6	3,7					
		V	4,9	5,22	5,61	6,02	5,9	5,22	3,86	2,82					

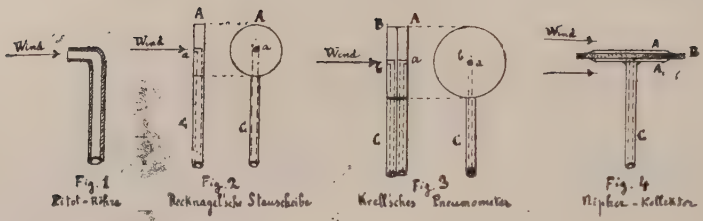


Fig. 1 Pitot-Röhre

Fig. 2 Recknagel'sche Stauscheibe

Fig. 3 Krell'sches Barometer

Fig. 4 Nipher-Kollektor

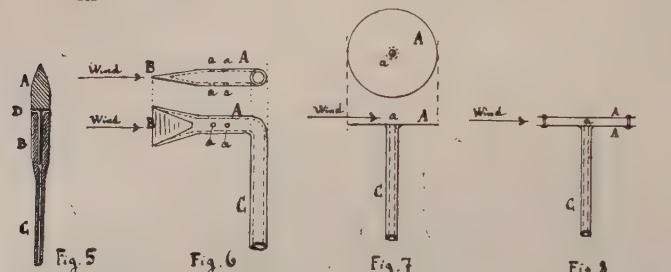


Fig. 5 Sonde von H. Zickendraht

Fig. 6 Sonde von Prandtl

Fig. 7 Sechs'sche Scheibe

Fig. 8 Doppelt-Scheibe von Abbé

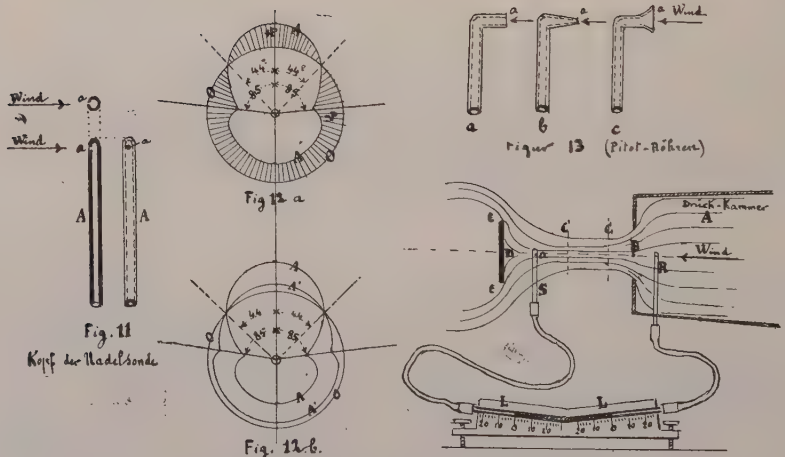


Fig. 11 Kopf der Nadelsonde

Fig. 12 a

Fig. 12 b. Null-Kreis Diagramm (für die Nadelsonde)

Figur 13 (Pitot-Röhren)

Figur 14 Versuch zur Prüfung der Nadelsonde

Koordinaten-Apparat

Fig. 20 a

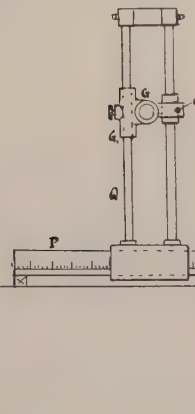


Fig. 20 b

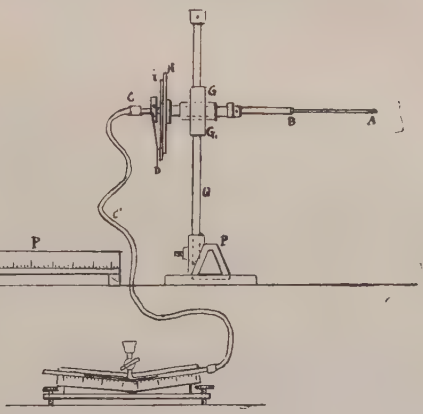


Fig. 21
Töplers Druck-Libelle

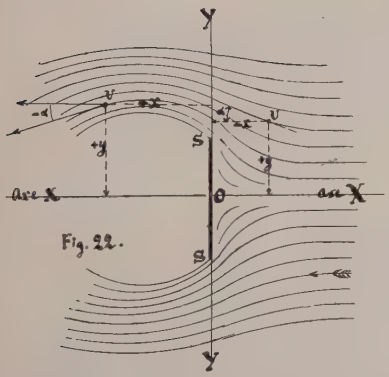


Fig. 22.

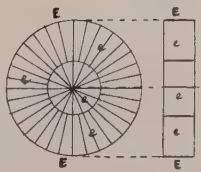


Fig. 24 b
Parallel-Richter

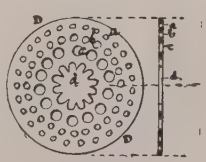


Fig. 24 a
Sieb-Wand

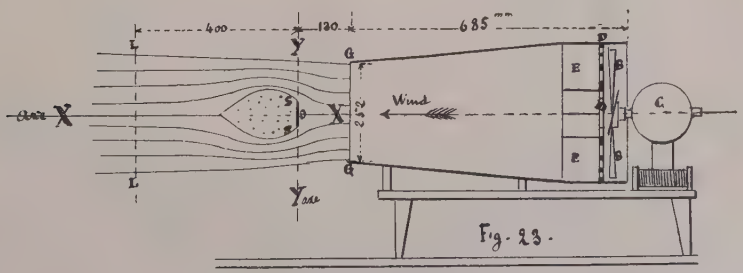


Fig. 23.

Seiten-Ansicht der gesammten Versuchs-Anordnung.

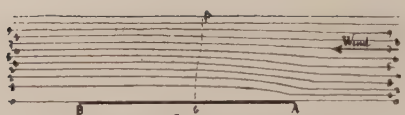
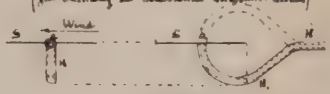


Fig. 15
Betrachtungen über die Derfflinger Scheibe

Fig. 16
Derfflinger Scheibe
(zur Änderung der Nadelstrahlen umgestellt werden)



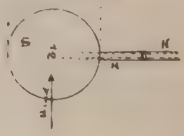


Fig 17
Nadelsonde - Querschnitt

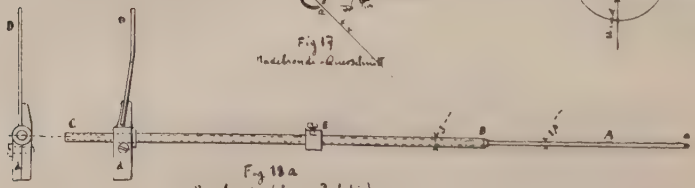


Fig 18a
Nadelsonde (ohne das Zubehör)

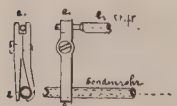


Fig 18b
Bremse des Sondenrohrs

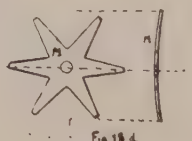


Fig 18d
Bremsfeder der losen Scheibe I

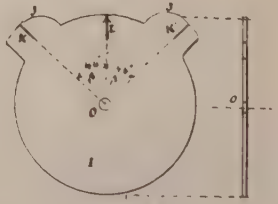


Fig 18c
Lose Scheibe I

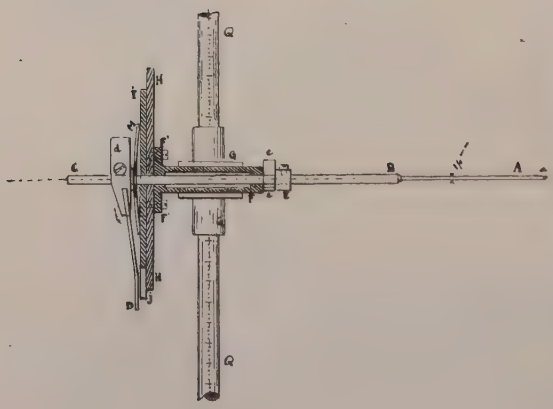


Fig. 19a
Vorn-Ansicht der Nadelsonde (ziehst Zubehör)

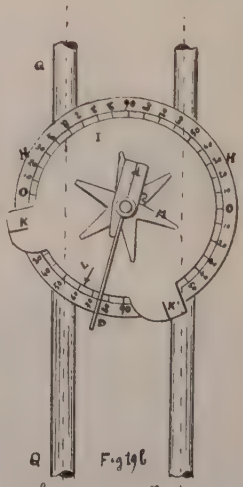
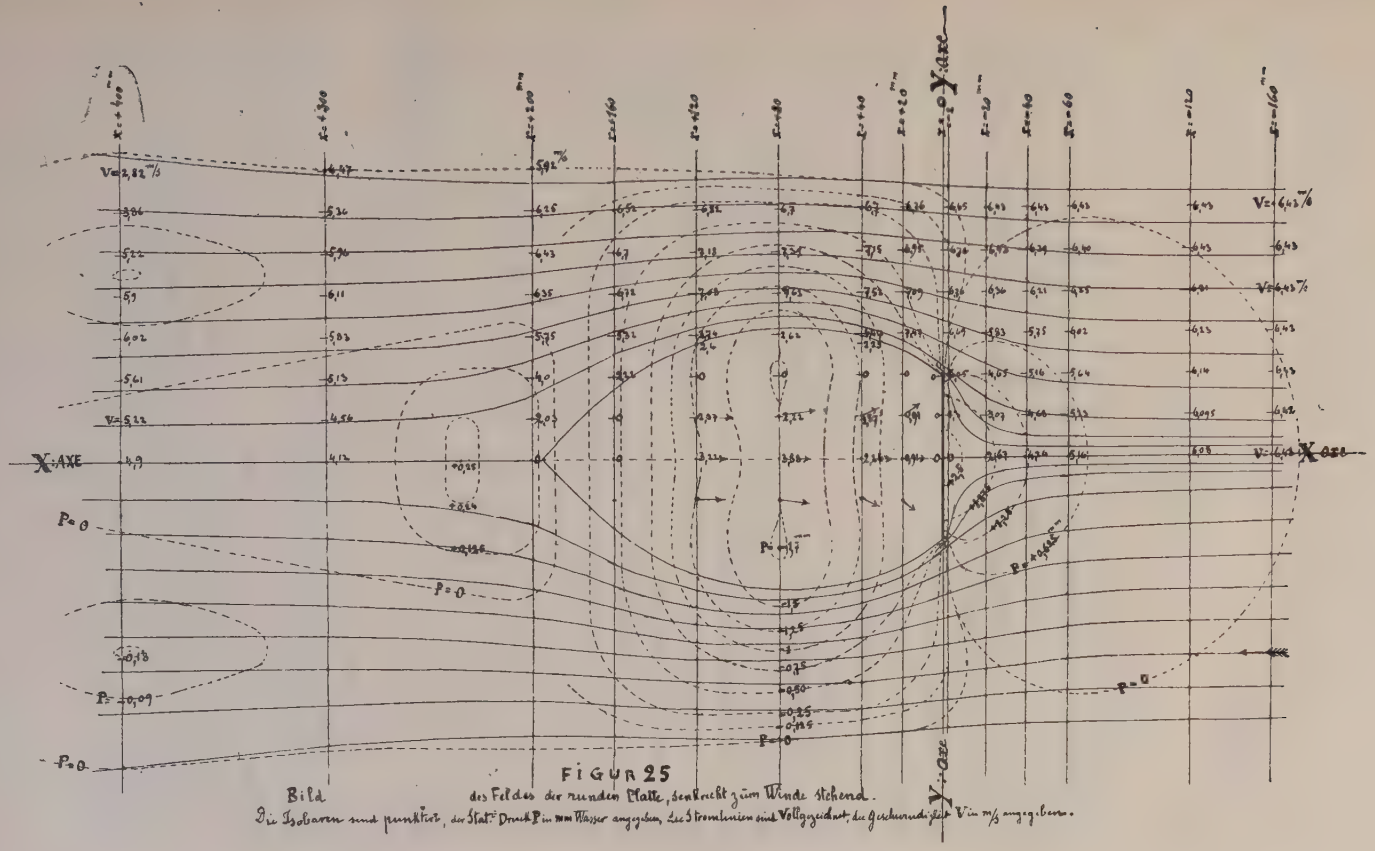


Fig 19b
Seiten-Ansicht der Nadelsonde (mit Zubehör)



FIGUR 25

Bild des Feldes der runden Platte, senkrecht zum Winde stehend.

Die Isobaren sind punktiert, der Stat. Druck P in mm Wasser angegeben, die Stromlinien sind Vollgezeichnet, die Geschwindigkeit V in m/s angegeben.

Vita.

Ich bin in Sennheim (Ober-Elsass), im März 1861 geboren. Nachdem ich in Sennheim die Primarschule absolviert, kam ich nach Mülhausen in die Ober-Realschule, welche ich bis zu meinem 18. Lebensjahr besuchte, als ich meine Studien wegen schwerer Krankheit unterbrechen musste, ein Jahr vor Erlangung des Abitur-Zeugnisses (Maturität), welches ich deshalb nicht besitze.

Nach fast einjähriger Unterbrechung meiner Studien besuchte ich dann die Mülhauser Fachschule (Technikum): „Höhere Spinn- und Webeschule", welche ich mit Erfolg absolvierte, und vervollständigte nebenbei meine theoretischen Kenntnisse, durch Privatstunden über Mathematik, Physik und Mechanik bei Herrn Prof. Dr. Johnen in Mülhausen.

In meinem 21. Lebensjahr trat ich, da ich militärfrei (untauglich) war, bei der Firma „Dollfus-Mieg & Cie." in Mülhausen (Spinnerei und Nähfaden) als Assistent des technischen Leiters ein, wo ich während drei Jahren als solcher, und zwei weitere als Unter-Direktor tätig war, und wo ich nebenbei noch immer meine theoretisch-wissenschaftlichen Studien fortsetzen konnte.

Dort hatte ich das Glück, meine erste Erfindung auf dem Gebiete der Maschinentechnik zu machen, d. h. die damalige Hübner'sche Kämm-Maschine für Baumwolle zu verbessern, welche dann von der Firma Dollfus-Mieg überall patentiert und erfolgreich ausgebeutet wurde.

Dank diesem ersten Erfolg bekam ich Eintritt als Ingenieur in die „Elsässische Maschinenbau-Gesellschaft" in Mülhausen, ebenfalls eine Weltfirma mit 10,000 Arbeitern.

Von dieser Firma wurde ich beauftragt, eine neue Kämm-Maschine für Wolle zu schaffen, an welchem Problem die betreffende Firma schon lange Jahre, aber ohne grossen Erfolg, arbeitete.

Es gelang mir nun, nach mehrjährigen Studien und Experimenten, eine solche neue Maschine zu schaffen. Diese, für die Firma sehr wichtige Erfindung (welche in allen Ländern patentiert wurde), hatte einen so grossen Erfolg, dass die Firma während der 15jährigen Dauer der Patente, viele Millionen damit verdiente, und diese Maschine in aller Welt Verbreitung fand.

Inzwischen hatte ich ein zweites Problem: Schaffung einer Kämm-Maschine für Baumwolle in Arbeit genommen, und erlangte hier ebenfalls einen so grossen Erfolg, dass auch diese überall, in Europa und Amerika gekauft und verbreitet wurde.

Nach Ablauf der Patent-Dauer dieser beiden Maschinentypen, habe ich abermals 2 weitere neue Kämm-Maschinentypen für Wolle, Seide und für Baumwolle konstruiert, welche wieder den gleichen Erfolg wie die ersten erzielten. Diese letztere Erfindung datiert vom Jahre 1910 und hat erfolgreich die Konkurrenz mit den englischen Systemen bestanden.

Diese Erfindungen und noch andere, wie Mess-Apparate, Verbesserungen an verschiedenen Maschinen u. s. w., haben meinem Namen als Erfinder und Ingenieur in sämtlichen modernen Lehrbüchern der Spinnerei Eintritt verschafft, z. B. im „Lehrbuch der Spinnerei“ von Prof. H. Brüggemann (Mülhausen), im „Handbuch der Spinnerei und Kämmerei“ von Prof. Dr. Johannsen (Reutlingen), im „Aide-mémoire de la Filature“ von Haeffelé & Dupont (franz. Lehrbuch) u. s. w., wo meine Erfindungen ausführlich beschrieben und abgebildet sind.

Auch bin ich schon lange Jahre im Vorstand der „Höheren Spinn- und Webschule“ in Mülhausen, sowie auch als Mitglied des „Ausschuss für Mechanik“ der „Industriellen Gesellschaft“ von Mülhausen tätig.

Vor zwei Jahren war von verschiedenen Professoren der Technologie, namentlich von Prof. Brüggemann (Mülhausen), Prof. Dr. Johannsen (Reutlingen), Geh.-Rat Prof. Dr. E. Müller (Hochschule Dresden), die Anregung gegeben worden, mich für den Titel „Doctor honoris causa“ vorzuschlagen, wie aus Briefen dieser Herren an Herrn Prof. Brüggemann, der sie mir gezeigt, bestimmt hervorging. Der Krieg hat inzwischen die Sache verschoben. — Ich hätte es als eine Krönung meiner dreissigjährigen Tätigkeit

als Erfinder uud Ingenieur bei der Elsässischen Maschinenbau-Gesellschaft angesehen.

Nun habe ich Mülhausen im September 1914 nach der dortigen Schlacht wegen überreizter Nerven infolge dieser Ereignisse verlassen und mich nach Basel gewandt.

Meine Zeit in Basel benutzte ich, indem ich mich im Frühjahr 1915 bei der Universität Basel als Stud. phil. II immatrikulieren liess und bei Herrn Prof. A. Hagenbach ein Vollpraktikum für Experimental-Physik belegte. Dort habe ich die nötigen Experimental-Studien und Arbeiten zur Ausführung vorliegender Doktor-Dissertation erledigt. Ich habe somit zwei volle Semester der Universität Basel als Stud. phil. II angehört. Leider wurde ich gezwungen, wegen andauernden Unwohlseins (Asthma und Katarrh) den Winter in Siders (Wallis) zu verbringen, woselbst ich die vorliegende Dissertation geschrieben habe.

Ich werde nächstens wieder meine Stelle in der Elsässischen Maschinenbau-Gesellschaft aufnehmen, die mir reserviert geblieben ist.

Frühere Publikationen:

1. Recherches experimentales sur les roulements à billes, Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse 1905.
2. Force et élasticité des filés en coton, Bull. 1907.
3. Considérations sur la nature de l'éther cosmique, Exposé élémentaire de la theorie électromagnétique de la lumière de Maxwell, Bull. 1909.